

UDK 728.3.004.67:699.84

Primljeno 21. 10. 2010.

# Proračun povijesne zidane zgrade

Cengiz Ozmen, Asli Er Akan, Ali Ihsan Unay

## Ključne riječi

povijesne građevine,  
zidana zgrada,  
obiteljska kuća,  
potres, Turska,  
armiranobetonska ploča,  
otpornost zgrade

## Key words

historic structures,  
masonry building,  
family house,  
earthquake, Turkey,  
reinforced-concrete slab,  
resistance of a building

## Mots clés

structures historiques,  
bâtiment en maçonnerie,  
maison de famille,  
tremblement de terre,  
Turquie,  
dalle en béton armé,  
résistance du bâtiment

## Ключевые слова

историческое здание,  
здание с каменной  
кладкой,  
семейный дом,  
землетрясение, Турция,  
железобетонная плита,  
устойчивость здания

## Schlüsselworte

geschichtliche Gebäude,  
gemauertes Gebäude,  
Familienhaus,  
Erdbeben, Türkei,  
Stahlbetonplatte,  
Widerstandsfähigkeit des  
Gebäudes

C. Ozmen, A. Er Akan, A. I. Unay

Stručni rad

## Proračun povijesne zidane zgrade

U radu se polazi od toga da postoje povijesne zidane građevine na kojima se često obavljaju izmjene i adaptacije da bi se prilagodile suvremenoj upotrebi. Istraživana je zidana obiteljska kuća u Turskoj građena početkom 20. stoljeća koja se nalazi u području mogućih jačih potresa. Proveden je proračun primjenom turskih propisa za izvornu zgradu i za zgradu na kojoj su obavljene izmjene. Ubacivanje armiranobetonske ploče bitno je povećalo otpornost zgrade na djelovanje potresa.

C. Ozmen, A. Er Akan, A. I. Unay

Professional paper

## Analysis of a historic masonry building

The paper starts from the observation that historic masonry buildings are often modified and altered to make them fit for present day use. A single-family masonry house in Turkey, situated in an earthquake prone area and built in the early 20<sup>th</sup> century, is studied. The analysis is made based on Turkish regulations for the initial building and for the building after alterations. Introduction of a reinforced-concrete slab has greatly improved seismic resistance of the building.

C. Ozmen, A. Er Akan, A. I. Unay

Ouvrage professionnel

## Analyse d'un bâtiment historique fait en maçonnerie

L'ouvrage commence par l'observation que les bâtiments historiques en maçonnerie ont été souvent modifiés ou altérés afin de les adapter à l'usage moderne. Une maison de famille en Turquie, située dans une zone sismique et construite au début du 20<sup>e</sup> siècle, a été étudiée. L'analyse a été faite selon les règlements turques pour le bâtiment dans l'état initial et pour le bâtiment après altérations. L'introduction d'une dalle en béton armé a amélioré de façon notable la résistance sismique du bâtiment.

Ц. Озмен, А. Эр Акан, А. И. Унай

Отраслевая работа

## Расчет исторического здания с каменной кладкой

Статья основывается на том, что существуют исторические здания, которые часто подвергаются переделке и адаптации с учетом их современного назначения. Исследован семейный дом в Турции, построенный в начале 20 века, находящийся в зоне возможных сильных землетрясений. Произведен расчет с применением турецких норм для первоначального варианта здания и для здания, подвергшегося переделке. Установка железобетонной плиты в значительной степени повысила устойчивость здания в случае землетрясения.

C. Ozmen, A. Er Akan, A. I. Unay

Fachbericht

## Berechnung eines geschichtlichen gemauerten Gebäudes

Im Artikel geht man davon aus dass geschichtliche gemauerte Gebäude bestehen an denen oft Änderungen und Umbau unternommen werden um sie zeitgemässer Benutzung anzupassen. Untersucht wurde ein gemauertes Familienhaus in der Türkei, erbaut anfangs des 20. Jahrhunderts, welches sich im Gebiet möglicher stärkerer Erdbeben befindet. Durchgeführt wurde eine Berechnung nach türkischen Vorschriften für das ursprüngliche Gebäude und für das Gebäude an dem Änderungen unternommen waren. Der Einbau einer Stahlbetonplatte erhöhte die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes gegen die Einwirkung des Erdbebens.

Autori: Doc. dr. sc. **Cengiz Ozmen**, Department of Architecture, Çankaya University, Ankara, Turkey; doc. dr. sc. **Asli Er Akan**, Department of Architecture, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey ; prof. dr. sc. **Ali Ihsan Unay**, Department of Architecture, Gazi University, Ankara, Turkey

## 1 Uvod

Najveći dio stambenog fonda u Anatoliji sastoji se od modernih armiranobetonskih zgrada. Međutim, u toj regiji još uvijek nalazimo i dosta manjih zidanih obiteljskih povijesnih kuća u urbanim i u seoskim sredinama. Te su zidane građevine značajan dio anatolijskoga kulturnog naslijeđa pa se stoga za neke od tih kuća izrađuju konzervatorske i restauratorske studije. Iskustva stečena u proteklom katastrofama kao što su potresi pokazuju da su te građevine podložne djelomičnom ili potpunom rušenju ako su prethodne konzervatorske i restauratorske radnje obavljene ne vodeći računa o konstrukcijskim svojstvima građevine.

Sigurnost konstrukcije osobito je važna u slučajevima kada je građevina nastanjena ili se obnavlja za stanovanje nakon što je dugo vremena bila zapuštena. Ako se stara zidana građevina namjerava rabiti za stanovanje, uglavnom se ne mogu izbjeći arhitektonske i konstrukcijske izmjene postojećeg stanja radi prilagodbe zahtjevima suvremenog načina života. Uvođenje elemenata koji nisu postojali u prvobitnom rješenju često negativno utječe na konstrukciju građevina, i to na seizmički nepovoljan način. U državi visokoga seizmičkog rizika kao što je Turska, sigurnosni zahtjevi koje treba primjenjivati pri konzervatorskom ili restauratorskom radu na zidanim građevinama ne mogu se postignuti bez odgovarajućeg proračuna konstrukcije, posebno seizmičkih utjecaja.

Općenito uzevši, zidane su građevine izrazito otporne na vertikalna opterećenja, ali ne i za horizontalna djelovanja. Osjetljivost na horizontalna djelovanja, što posebno dolazi do izražaja pri potresu, uglavnom se javlja zbog mehaničkih svojstava zidanog materijala, geometrijske konfiguracije te nedostatka učinkovitosti spojeva između konstrukcijskih elemenata. S druge strane, zidane konstrukcije imaju, u slučaju potresa, i neke prednosti u odnosu na ostale konstrukcije jer obično nemaju velike otvore koji bi mogli dovesti do kritičnih naprezanja, imaju povoljan geometrijski raspored pregrada i što je najvažnije, posmična nosivost tih građevina vrlo je velika zbog velike ploštine poprečnog presjeka nosivih zidova [1].

Za razliku od suvremenih armiranobetonskih građevina koje se masovno grade, svaka povijesna zidana kuća s konstrukcijskog je stajališta jedinstvena građevina. Ponašanje takve konstrukcije teško se može procijeniti analitičkim postupcima razvijenima za suvremene građevine. S druge strane, metode numeričkog modeliranja i proračuna vrlo su korisne kao sredstvo za ocjenjivanje stanja konstrukcije povijesnih zidanih građevina. Zbog velikog napretka koji je posljednjih godina zabilježen u primjeni računala i programske podrške, sada se mogu

provoditi linearni ili nelinearni proračuni kojima se na prikladan način može iskazati složeno ponašanje zidane konstrukcije pod vertikalnim i horizontalnim djelovanjem [2].

Nelinearni se proračuni često primjenjuju za predočavanje ponašanja konstrukcija zidanih povijesnih građevina jer omogućuju precizno simuliranje izrazito nelinearnog ponašanja građevinskih materijala, te uključivanje u numerički model parametara kao što su stvaranje pukotina i slijeganje. S druge pak strane osnovni je nedostatak nelinearnih proračuna njihova velika složenost te potreba uvođenja eksperimentalnih podataka radi preciznog kalibriranja modela. Zbog tih se poteškoća nelinearni proračuni uglavnom primjenjuju kada se radi o velikim građevinama koji su povijesno značajni te građevinama s deformacijama i izrazito lošim stanjem materijala [3].

Kada se radi o zidanim građevinama manjih dimenzija, kao što su kuće kod kojih nema većih pukotina ni znatnijih pojava slijeganja, tj. lošega stanja materijala, djelotvorniji su ipak jednostavniji linearni proračuni. Linearni su proračuni dostatni za dokazivanje interakcije između pojedinih konstrukcijskih elemenata, za određivanje eventualnog prekoračenja graničnih stanja te za definiranje područja u kojima dolazi do kritičnih naprezanja pod raznim djelovanjima kao što je na primjer potres [3].

U ovome se radu analiziraju statički i dinamički utjecaji na stambenoj zgradi staroj stotinju godina koja se nalazi u Kapadokiji u Turskoj. Upotrijebljen je linearni proračun metodom konačnih elemenata. Predložen je jednostavan analitički postupak koji se rabi za ocjenu ponašanja konstrukcija manjih povijesnih građevina, a u sklopu postupka restauracije ili arhitektonske prenamjene. Posebno je razmatran način na koji promjene u konstrukciji utječu na seizmičko ponašanje građevine.

## 2 Predmet ispitivanja

Neki od najznačajnijih primjera zidanih građevina u Anatoliji nalaze se u gradu Mustafapasa u okrugu Ürgüp u Kapadokiji. Predmet ove analize jest kamena zidana građevina izgrađena početkom dvadesetog stoljeća (otprilike između 1900. i 1905. godine) kao obiteljska zgrada (slika 1.) što je i bila do 1924. godine. Nakon tog razdoblja kuća je, između ostalog, bila i skladište potrepština za oružane snage, zatim škola te lokalni dom zdravlja. Na kraju je kuću kupio jedan od potomaka prvoga vlasnika pa je ponovno služila za stanovanje. U toku dvadesetog stoljeća na konstrukciji su obavljani brojni popravci i izmjene. Osim toga, početkom restauracije uočene su i neke izmjene koje su izvršili prethodni stanari. Najznačajnija je od tih izmjena izvedena armiranobetonska ploča debljine 15 cm koja je položena na zidove od kamena na razini krova (slika 2.).



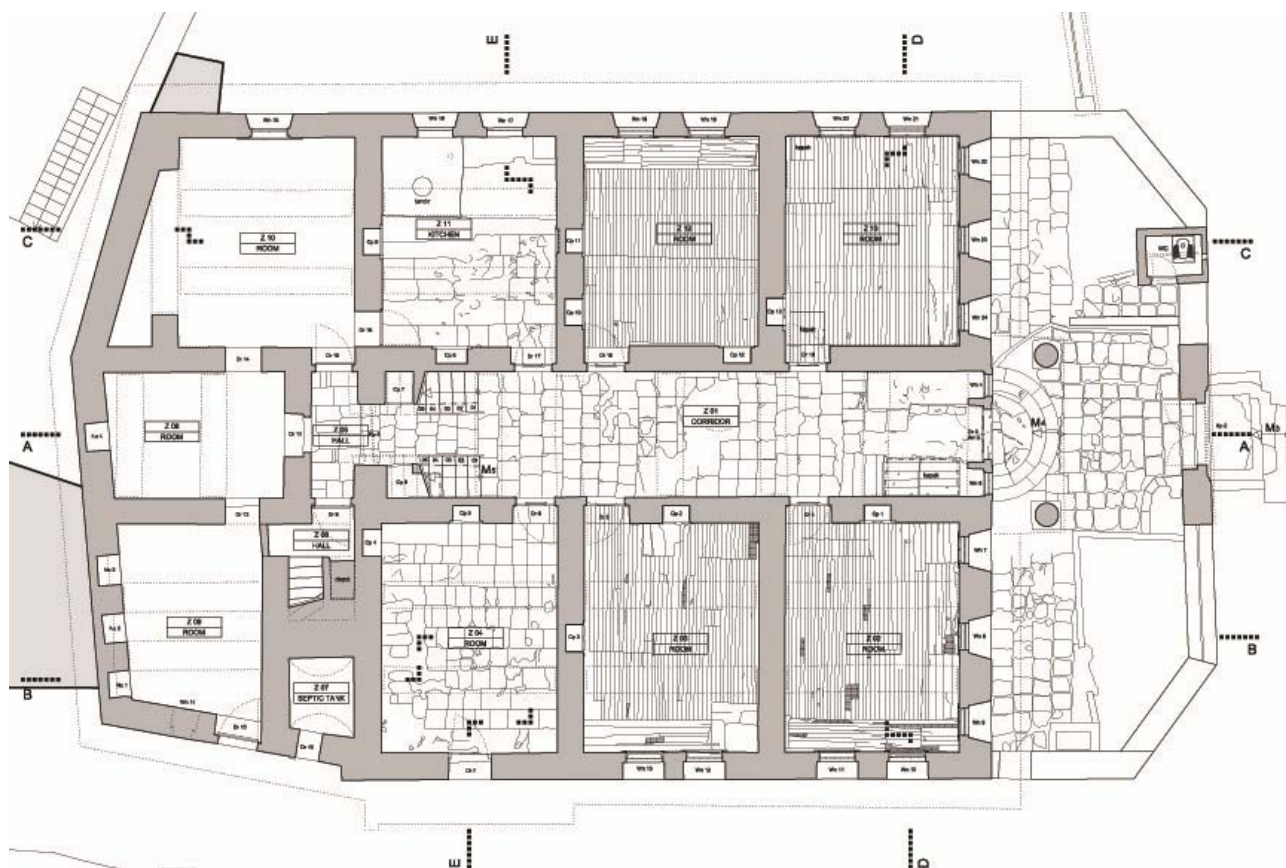
Slika 1. Ispitivana dvokatna zidana građevina

Zgrada veličine 21,5 x 17,5 m uglavnom je pravokutnog tlocrta. Sjeveroistočno i sjeverozapadno pročelje zatvaraju kut od oko 15 stupnjeva s uzdužnim zidovima zgrade. Prosječna je visina konstrukcije, računajući od razine temelja, 10 m. Debljina nosivih zidova od kamena je 70 cm u prizemlju. Na toj su razini svojstva materijala i poprečne dimenzije unutarnjih zidova isti kao i kod obodnih zidova. Na prvome je katu debljina obodnih zidova 50 cm, dok je debljina unutarnjih zidova 15 cm. Tlocrti



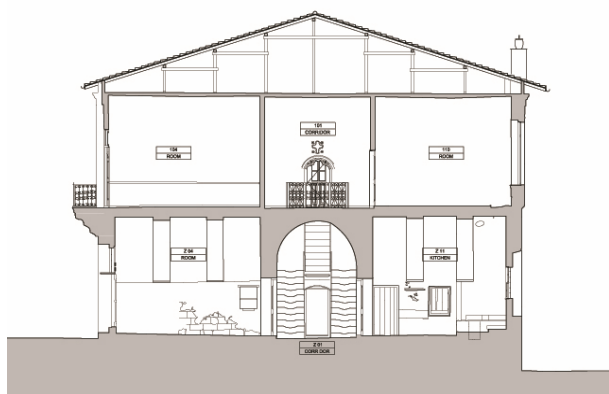
Slika 2. Armiranobetonska ploča izvedena i na stropu prvoga kata

građevine prikazani su na slikama 3. i 4., a presjeci na slikama 5. i 6. Sastav zidanih zidova je homogen duž čitave konstrukcije. Nema znatnijih pukotina ili slijeganja koji bi mogli negativno utjecati na stabilnost građevine. Stropna konstrukcija koja dijeli prizemlje od prvoga kata sastoji se od niza svodova oslonjenih na kamene zidove koji se nalaze između soba (slika 6.). Prvobitno su strop prvoga kata i krov građevine bili izvedeni od drvene građe, ali je sada strop naknadno izvedena armi-

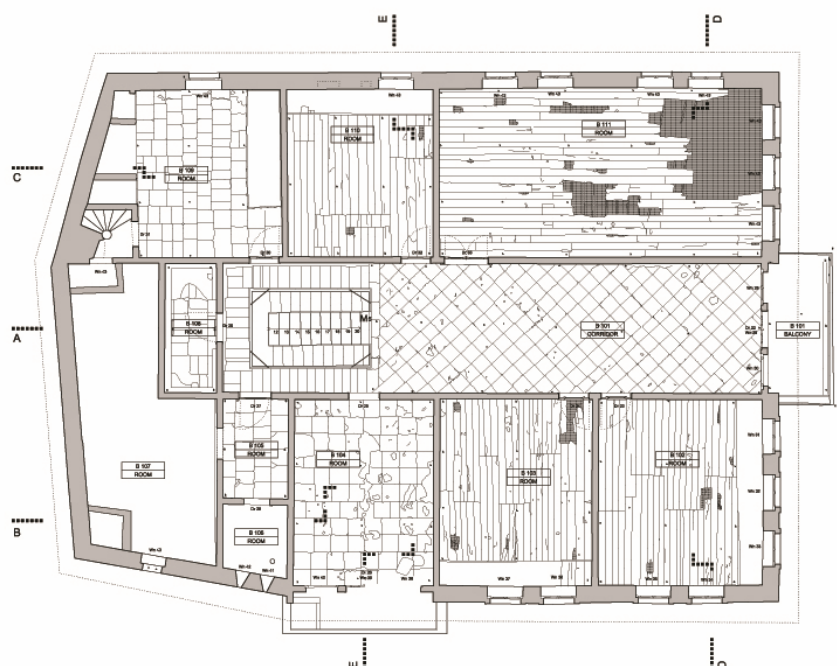


Slika 3. Tlocrt prizemlja građevine





Slika 4. Poprečni presjek građevine



Slika 5. Tlocrt prvoga kata građevine

ranobetonska ploča, dok je novi krov od drvene građe postavljen iznad te armiranobetonske ploče (slika 7.). Temelji građevine leže na čvrstoj stijenskoj podlozi.

Građevina se sastoji od prizemlja i kata. U prizemlju su sobe uz središnji hodnik (slika 3.). Na toj je razini ukupno šest pravokutnih soba, otprilike iste veličine, simetrično položenih uz obje strane hodnika. Na kraju središnjeg hodnika nalaze se stuba, a iza stuba su tri prostorije i skladišni prostor s polukatom. Tlocrt tih prostorija je nepravilan zbog prostornih ograničenja.

Prvi kat je tlocrtno sličan prizemlju i tu postoji središnji hodnik (slika 4.). Za razliku od prizemlja tu su dvije prostorije pravokutnog tlocrta smještene istočno od hodnika. Jedna od tih prostorija otprilike je dvostruko veća od druge. Zapadno od hodnika nalaze se tri jednake

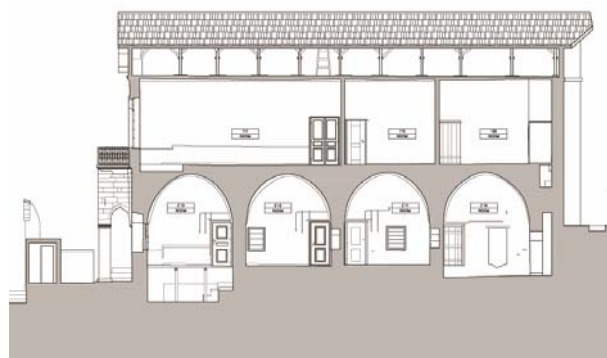
prostorije također pravokutnog tlocrta. Dvije prostorije nepravilnog tlocrta smještene su iza stuba. Prostorija smještena uz sjeveroistočno pročelje ima stuba koje vode u tavanski prostor. Iza stuba smještena su također dva relativno skućena skladišna prostora pravokutnog tlocrta.

U toku adaptacije građevine, tj. njezina pretvaranja u suvremeni stambeni prostor, obavljani su opsežni restauratorski radovi da bi se sačuvala povijesna obilježja te kuće. Uz restauratorske su radove obavljene i određene izmjene u skladu s prostornim zahtjevima novog vlasnika, uglavnom u prizemlju. Neke od njih, kao što je na pr. uvođenje instalacija za kupaoalice, ne utječu bitno na konstrukcijski sustav građevine. Ostale izmjene, kao što

su izbijanje novih otvora u zidovima koji nose svod, tj. strop prvoga kata, izravno utječu na nosivi sustav građevine.

U prizemlju su otvori izbijeni u zidu između prve i druge prostorije na istočnoj strani središnjeg hodnika (slika 8.) što izravno utječe na konstrukcijski sustav. Ta je izmjena obavljena da bi se dobila veća blagovaonica u skladu sa zahtjevima novog vlasnika. Isto tako, zahvat je napravljen i na zidu između treće i četvrte prostorije da bi se otvorio prostor za suvremenu kuhinju. Te

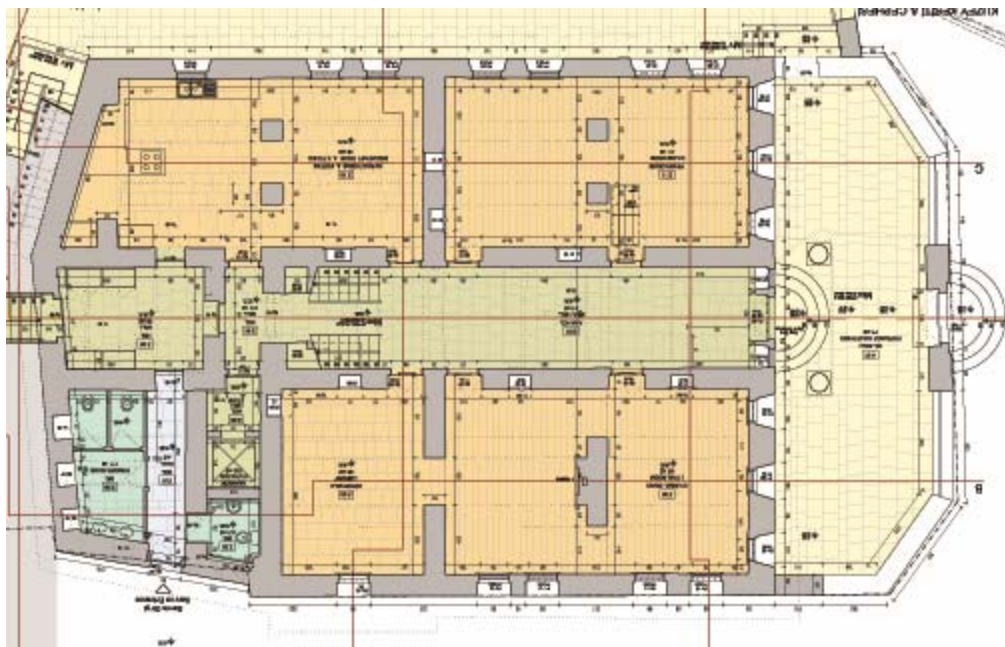
su dvije izmjene umanjile nosivost zidova između prostorija, tako da su zidove zapravo svele na stupove. Slični



Slika 6. Uzdužni presjek građevine



Slika 7. Drvena krovna konstrukcija na armiranobetonskoj ploči



Slika 8. Tlocrt prizemlja s unesenim izmjenama

su otvori napravljeni i između prve, druge i treće prostorije zapadno od središnjeg hodnika. Taj je zahvat obavljen da bi se povećao dnevni boravak koji je povezan s manjim prostorom knjižnice. Kamin je projektiran u zidu između dvaju dijelova novoga dnevnog boravka. Iako u toku posljednjega restauratorskog zahvata na prvom katu nisu napravljene bitnije izmjene, treba spomenuti da je u toku prijašnjih radova ugrađena armiranobetonska ploča debljine 15 cm koja čini strop prvoga kata i koja neizbježno utječe na ponašanje nosivog sklopa ove građevine.

### 3 Metoda proračuna

Jedan od najboljih načina proračuna konstrukcija zidanih građevina jest metoda konačnih elemenata. U osnovi ta se metoda sastoji u raščlanjivanju konstrukcije kao

sklopa koji ima konačni broj linijskih i dvodimenzijских ili trodimenzijских elemenata. To su i konačni elementi. U tom se postupku radi o diskretizaciji konstrukcije. Broj, veličina i vrsta elemenata ovise o procjeni projektanta. Ti su elementi međusobno spojeni u točkama koje nazivamo čvorovima. Taj postupak, u kojem se u obzir uzima geometrijski oblik konstrukcije, ograničenja na mjestu spajanja i opterećenje, zajednički se naziva analitičkim modelom konstrukcije [4].

Da bi se iz analitičkog modela mogli izvesti pouzdani realni rezultati valja izraditi detaljnu studiju u okviru koje točno treba opisati fizikalna i geometrijska svojstva materijala, kao i stanje konstrukcijskih elemenata građevine. Ako je moguće, mehanička svojstva materijala i komponenta određuju se na temelju podataka dobivenih iz uzoraka izvađenih iz same građevine

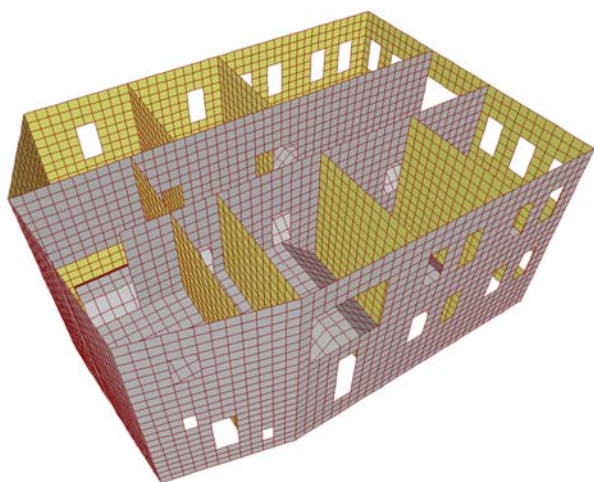
te na temelju dokumenata o građenju i ocjene stanja gotove konstrukcije sofisticiranom tehničkom opremom. Kada takvi eksperimentalni podaci nisu dostupni, pretpostavke o svojstvima materijala od kojih se sastoji zidana konstrukcija mogu se izvesti iz dostupne stručne literature o sličnim građevinama ili se pak osnovni pokazatelji mogu definirati u skladu s lokalnim tehničkim pokazateljima koji su dostupni na razini svake države [5], [6].

Kao što je spomenuto u uvodu, nelinearnim se proračunom dobivaju realniji rezultati za povijesne zidane građevine ako je broj podataka prikupljenih vađenjem uzoraka i mjerenjima instrumentima dostatan za kalibriranje numeričkih modela. Međutim, u najvećem broju restauratorskih i konzervatorskih zahvata za tako nešto nema dovoljno vremena ili sredstava, a često uopće ne postoji potreba za provedbom tako detaljnih analiza. Kada se radi o građevinama neoštećene konstrukcije, koje su sastavljene od homogenih materijala, tada su linearni proračuni dostatni za razumijevanje ponašanja građevine izložene raznim djelovanjima [3].

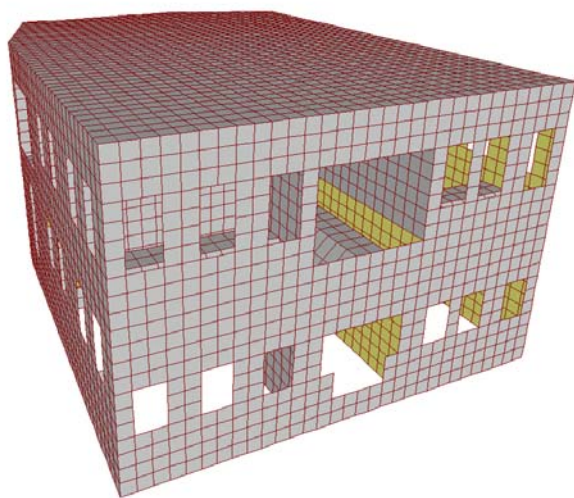
U ovoj je studiji obavljena serija linearnih proračuna da bi se ocijenio utjecaj nekih konstrukcijskih i arhitektonskih izmjena na sveukupno ponašanje promatrane zida-



ne građevine. Analitički modeli i proračuni izrađeni su računalnim programom SAP2000 [7]. Da bi se ocijenilo ponašanje konstrukcije pod utjecajem opterećenja i seizmičkog djelovanja, razvijena su i dva zasebna analitička modela. U prvom je modelu predstavljeno prvobitno stanje građevine (slika 9.), a drugim je modelom predstavljena građevina s naknadno dodanom betonskom pločom i predviđenim arhitektonskim izmjenama (slika 10.).



Slika 9. Prvi model konstrukcije - prvobitno stanje građevine



Slika 10. Drugi model konstrukcije - izmijenjeno stanje građevine

Za ovu je građevinu proračun proveden za prostorne konačne elemente 4223 čvora i 4351 element. Radi jednostavnijeg tumačenja rezultata proračuna, iz analitičkog su modela izostavljeni neki arhitektonski detalji kao što su lukovi na gornjem dijelu prozora, mali otvor izveden u stropu prvoga kata da bi se tako osigurali prostor za ugradnju dizala, drvena krovna konstrukcija, te zabatni zidovi na krovu. Pri određivanju opterećenja armiranobetonske ploče u obzir su uzeta i moguća opterećenja od krova.

Pretpostavke o svojstvima materijala definirane su nakon brižljive analize podataka kao što su: pretpostavke primjenjivane u sličnim modelima opisanima u stručnoj literaturi, te vrijednosti predložene u turskom zakonu o potresima (TEC) za svojstva materijala zidanih konstrukcija. Konačne su brojke definirane nakon analize onih koje bi mogle poslužiti za dobivanje najrealnijih rezultata [8].

Vrijednosti "modula elastičnosti" i "težine" definirane su na bazi pretpostavke da zidani elementi i mort djeluju kao jedinstven homogeni materijal. Ova se pretpostavka može smatrati prilično realnom pri određivanju ponašanja konstrukcije i to zato što su zidani elementi građevine sastavljeni od gotovo savršeno prijanjajućih elemenata od rezanog kamena, a na nosivim elementima nema uočljivih tragova pukotina ili slijeganja [8].

Masa ispunskog materijala ugrađenog između stropnih svodova i podne obloge prvog kata uzeta je u obzir pri određivanju mase svodnih elemenata. Za zidane zidove i svodove usvojen je modul elastičnosti od  $E = 450\,000\text{ kN/m}^2$  (450 MPa). Vrijednost od  $24\text{ kN/m}^3$  usvojena je kao težina zidova, dok je za svodove usvojena težina od  $36\text{ kN/m}^3$ . Za armiranobetonsku ploču prihvaćena je vrijednost od  $25\text{ kN/m}^3$ , dok je za modul elastičnosti usvojena vrijednost od  $E = 28.500.000\text{ kN/m}^2$ . Poissonov omjer iznosi 0,2 za sve materijale [4], [5], [6], [8].

Modeli su prvo proračunani za vertikalno opterećenje koje se sastoji od stalnog i uporabnog opterećenja. Ovom je metodom provjerena ispravnost modela, a također i ponašanje konstrukcije pri djelovanju vertikalnog opterećenja. Povrh toga, proračunana su i naprezanja do kojih dolazi u zidovima i svodovima od vertikalnog opterećenja, da bi se na taj način dobila podloga za proračune od seizmičkog djelovanja. Povrh toga, oba su modela analizirana u odnosu na opterećenja do kojih dolazi zbog gibanja tla definirano spektrom potresa.

Seizmička opterećenja koja djeluju na građevinu određena su u skladu s turskim zakonom o potresima koji se temelji na koeficijentu spektralne akceleracije, a definiran je sljedećom jednadžbom:

$$A(T) = I A_0 S(T)$$

gdje je:

$A_0$  - koeficijent stvarne akceleracije tla

$I$  - faktor važnosti građevine

$S(T)$  - koeficijent spektra.

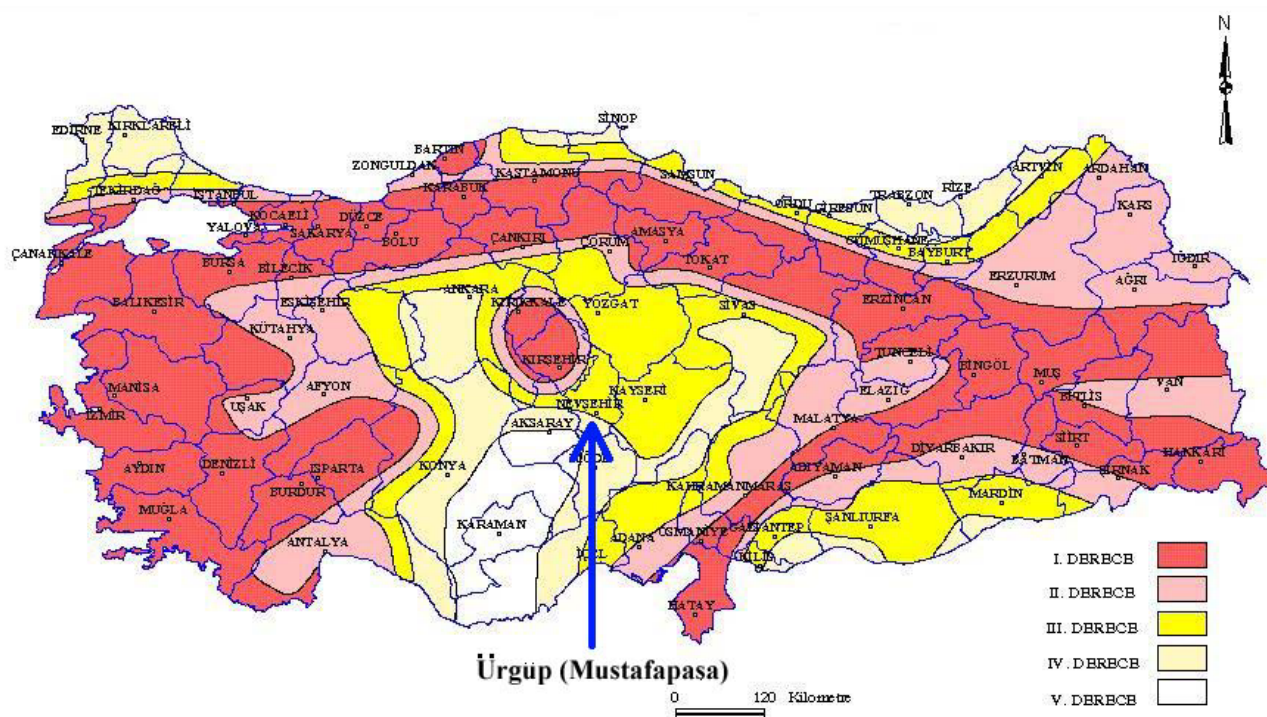
Pretpostavljeno je da se seizmička djelovanja neće događati istodobno u dva međusobno okomita smjera. Iz navedene se jednadžbe određuje koeficijent spektralne akceleracije  $A(T)$  koji odgovara petpostotnom priguše-

nom spektru proračunske elastične akceleracije, pri čemu je taj spektar normaliziran akceleracijom sile teže  $g$ . Tu vrijednost treba smatrati osnovom za određivanje seizmičkih djelovanja.

$A_0$  se određuje prema karti seizmičkih zona u Turskoj (slika 11.). Prema toj je karti Turska u odnosu na predvidivu stvarnu akceleraciju tla podijeljena na 5 potresnih područja. U seizmičkom području prvog stupnja  $A_0 \geq 0,40 g$ ; u seizmičkom području drugog stupnja  $0,30 g \leq A_0 \leq 0,40 g$ ; u seizmičkom području trećeg stupnja  $0,20 g \leq A_0 \leq 0,30 g$ ; u seizmičkom području četvrtog stupnja  $0,10 g \leq A_0 \leq 0,20 g$ ; a u seizmičkom području petog stupnja  $A_0 \leq 0,1 g$ . Promatrana povijesna zidana građevina nalazi se u seizmičkom području trećeg stupnja [9].

$$f_{all} = 0,3 \text{ MPa}$$

TEC je koncipiran tako da je važno osiguranje seizmičke otpornosti novih građevina. Stoga su koeficijenti smanjenja seizmičkog opterećenja ( $R$ ), kojima se u obzir uzima nelinearno elastoplastično ponašanje konstruktivnih elemenata u toku proračuna seizmičkog opterećenja, zapravo određeni za zidane zidove građene prema modernim materijalima i tehnologijama. Zapravo ne postoji način na koji bi se realno mogle pretpostaviti stvarne vrijednosti  $R$  koje bi bile primjenljive na povijesne zidane konstrukcije. Stoga pri ocjenjivanju rezultata nisu napravljena nikakva umanjenja opterećenja i seizmičkih djelovanja ( $R = 1$ ). Međutim u proračunu ipak treba uzeti u obzir nelinearno elastoplastično ponašanje zidanih elemenata pa su zato naprezanja dobivena u toku proračuna



Slika 11. Karta seizmičkih zona u Turskoj

Koeficijent spektra,  $S(T)$  određuje se prema vrsti tla i prema prirodnom periodu građevine  $T$ , a spektar elastične akceleracije određuje se posebnim istraživanjima uzimajući u obzir seizmičke uvjete područja i uvjete na lokaciji. Spektar potresa unosi se u model zasebno na dvije glavne osi  $EQ_x$  i  $EQ_y$ . Te se analize obavljaju u skladu s propisima TEC [8].

Točna slika o seizmičkoj otpornosti zidanih građevina može se dobiti uspoređivanjem maksimalnih razina naprezanja dobivenih proračunom prema dopuštenim naprezanjima. Prema sada valjanom TEC-u, dopušteno tlačno naprezanje ( $f_{all}$ ) iskazuje se sa:

uspoređena s trostrukim vrijednostima dopuštenih naprezanja. Takva je pretpostavka prihvatljiva jer su dopuštene razine naprezanja definirane u TEC-u određene s vrlo velikom mogućnošću pogreške, pa se ta metoda često rabi u seizmičkom proračunu povijesnih zidanih građevina u Turskoj [10]. Dopuštene razine naprezanja zidova i svodova ( $f_m$ ) pretpostavljene su:

$$f_m = 0,3 \times 3 = 0,9 \text{ MPa}$$

Usvojeno je da dopuštena vlačna naprezanja iznose 15 % od dopuštenoga tlačnog naprezanja [10]. U ovom slučaju, dopušteno vlačno naprezanje zidova i svodova pretpostavljena je:



$$f_{m(vlak)} = 0,9 \times 0,15 = 0,135 \text{ MPa}$$

Proračunske vrijednosti vlačnog/posmičnog naprežanja uspoređene su s graničnim vrijednostima vlačnog/posmičnog naprežanja ( $\tau_m$ ) dobivenima sljedećom formulom:

$$\tau_m = \tau_o + \mu \sigma$$

gdje je:

$\tau_m$  – granična vrijednost naprežanja za zidove

$\tau_o$  – dopuštena vrijednost naprežanja za pojavu pukotina u zidovima i svodovima

$\mu$  – koeficijent trenja (pretpostavljeno je da iznosi 0,5)

$\sigma$  – vrijednost vertikalnog naprežanja za zidove.

Dopušteno naprežanje za pojavu pukotina u zidovima i svodovima pretpostavljeno je:

$$\tau_o = 0,10 \times 3 = 0,30 \text{ MPa}$$

U skladu s preporukama koje su dane u Zakonu o potresima, pretpostavlja se da su veličine vertikalnog naprežanja za zidove manje od dopuštenoga tlačnog naprežanja za te konstrukcijske elemente, pa tako dopušteno posmično naprežanje za zidove i svodove iznosi:

$$\tau_m = 0,30 + 0,5 (0,9/2) = 0,53 \text{ MPa}$$

#### 4 Analiza i vrednovanje rezultata

Rezultati dobiveni metodom konačnih elemenata analizirani su da bi se odredio utjecaj planiranih izmjena, posebno uključujući i utjecaj zbog uklanjanja nekih nosivih zidova. Na temelju odgovarajućih proračuna doneseni su sljedeći zaključci:

Ocjena seizmičke analize utemeljena na metodi superponiranja oblika oscilacije obavljena je uspoređivanjem: prirodnih perioda (T) dobivenih za razne oblike oscilacije i maksimalnih pomaka ostvarenih prema spektru

projektirane akceleracije te uspoređivanjem maksimalnih vrijednosti naprežanja dobivenih kombiniranjem gravitacijskih opterećenja i seizmičkih djelovanja u svakom smjeru s maksimalnim razinama dopuštenog opterećenja konstrukcijskih elemenata. U analizu je uključeno prvih 30 oblika oscilacije građevine. Utvrđeno je da su prva 3 oblika važna.

Za prvi model, koji predstavlja prvobitno stanje konstrukcije, periodi prvih triju važnih oblika oscilacije iznose:

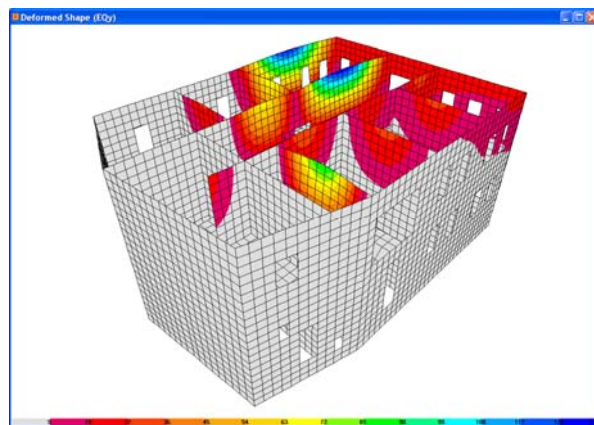
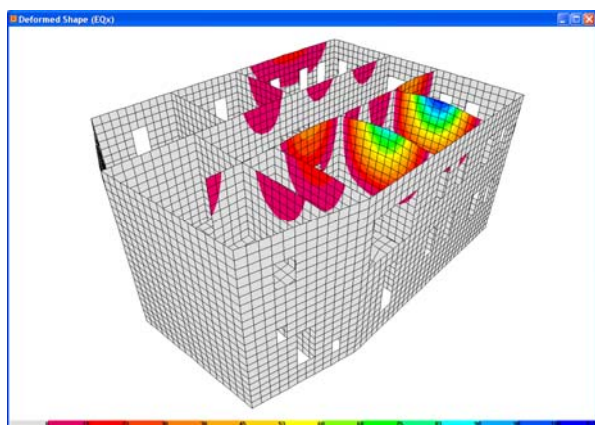
$$T_1 = 0,097 \text{ s}, T_2 = 0,055 \text{ s i } T_3 = 0,052 \text{ s.}$$

Za drugi model, koji predstavlja izmijenjeno stanje konstrukcije, periodi prvih triju važnih oblika oscilacije iznose:

$$T_1 = 0,057 \text{ s}, T_2 = 0,051 \text{ s i } T_3 = 0,045 \text{ s.}$$

Ipak, ne možemo zaključiti je li seizmičko ponašanje konstrukcije dobro ili loše tek na temelju vrijednosti prirodnog perioda. Način seizmičkog ponašanja također ovisi i o nekim drugim faktorima kao što su uvjeti tla i raspored dijelova konstrukcije. Međutim, pozitivnim se razvojem kod kamenih zidanih građevina smatra činjenica da su se periodi smanjili nakon ubacivanja armiranobetonskih ploča. U seizmičkom su proračunu varijacije perioda proporcionalne s krutošću konstrukcije. Građevine s vrlo fleksibilnim ili slabim konstrukcijskim sustavima odlikuju se većim prirodnim periodima. S druge strane, građevine s debelim zidanim zidovima, armiranobetonskim zidovima ili poprečnim ukрутama imaju relativno male prirodne periode.

Periodi koji su već u prvom modelu bili prilično mali smanjili su se gotovo za polovicu u drugom modelu. To znači da je došlo do povećanja sveukupne krutosti građevine. Kako su u ovoj građevini spojevi između susjednih nosivih zidova dosta čvrsti, to povećanje opće krutosti znači da će se u slučaju potresa konstrukcija ponašati kao zatvorena kutija boljih svojstava. Seizmička optere-



Slika 12. Pomaci prije dodavanja armiranobetonskih ploča od opterećenja EQx (a) i EQy (b)



čenja ravnomjernije su raspoređena na konstrukcijske elemente građevine. Kao rezultat takvog rasporeda sila, maksimalno postignuta naprezanja u drugom su modelu bitno smanjena. Stoga se može zaključiti da je građevina u slučaju potresa u potpunosti na strani sigurnosti.

Smanjenje prirodnih perioda također dovodi do manjih bočnih pomaka konstrukcijskih elemenata. Iako su oba modela ispitana za djelovanje hipotetskog potresa koji je mnogo snažniji od statistički mogućeg, ipak su pomaci zabilježeni u toku ispitivanja bili vrlo mali. Za prvi model, u kojem se opisuje prvobitno stanje građevine, proračunano je da su vrijednosti maksimalnog pomaka pod seizmičkim djelovanjem 86 mm u smjeru  $x$  i 94 mm u smjeru  $y$  (slika 12.). Kako je visina ovog čvora 10 m iznad razine tla, proračunano je da koeficijent relativnog pomaka iznosi 0,009. I ova se vrijednost nalazi u području prihvatljive sigurnosti za ovu vrstu građevina [11].

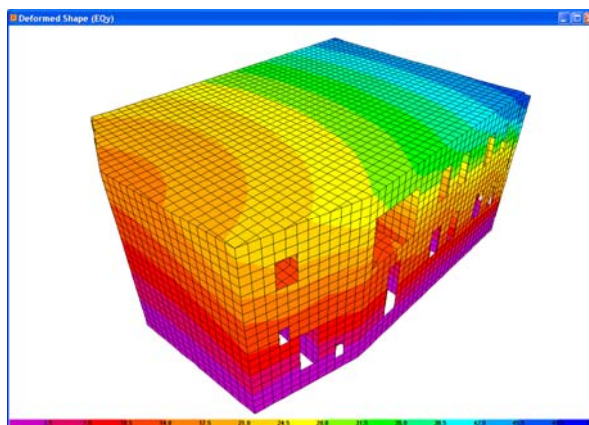
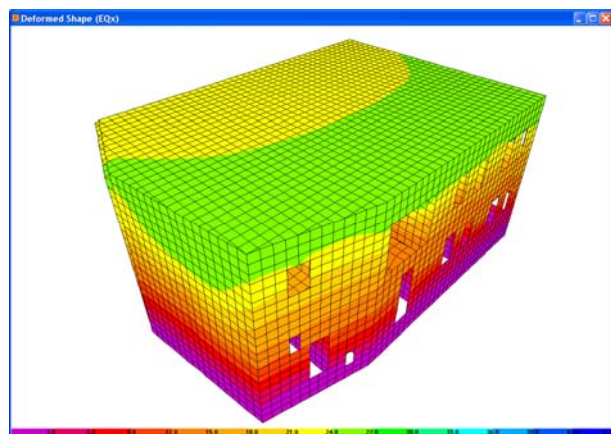
U drugom modelu s armiranobetonskim pločama maksimalni su pomaci 25 mm u smjeru  $x$  i 44 mm u smjeru  $y$  (slika 13.). Što se tiče bočnih pomaka, zaključeno je da se sigurnost konstrukcijskog sustava građevine još više povećala nakon dodatka armiranobetonskih ploča te

nakon uzimanja u obzir predloženih arhitektonskih izmjena.

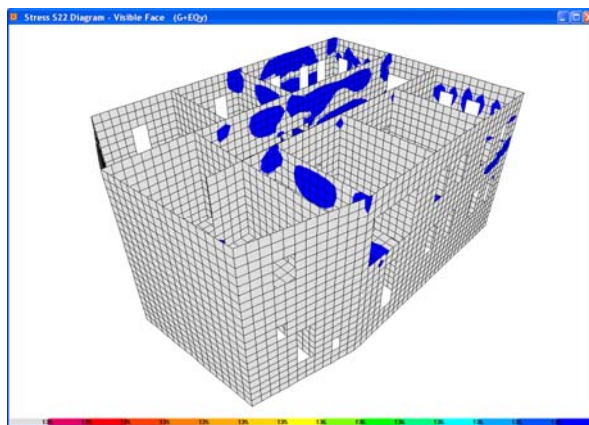
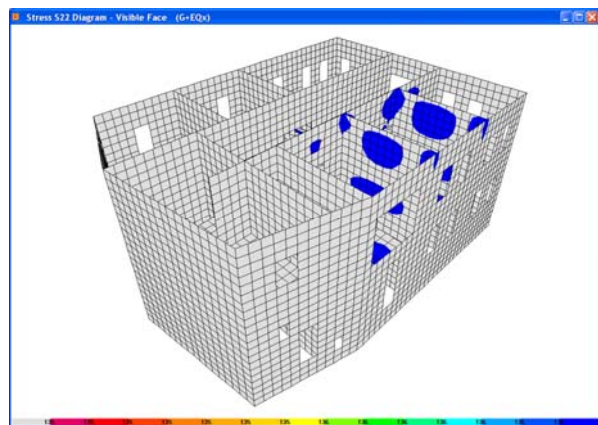
U prvom modelu u kojem se opisuje prvobitno stanje građevine ukupna je težina građevine 47226 kN. Ukupna poprečna sila u smjeru  $EQ_x$  iznosi 1889 kN (4 % od ukupne težine građevine); ukupna poprečna sila u smjeru  $EQ_y$  iznosi 2834 kN (6 % od ukupne težine građevine).

U drugom modelu, u kojem je dodana armiranobetonska ploča, ukupna težina građevine iznosi 48446 kN. Ukupna osnovna posmična reakcija u smjeru  $EQ_x$  iznosi 2423 kN (5 %), a ukupna osnovna posmična reakcija u smjeru  $EQ_y$  iznosi 3347 kN (7 %).

U prvom modelu u kojem se opisuje prvobitno stanje građevine, najveća naprezanja pod seizmičkim opterećenjem nalaze se na unutarnjim zidovima velike prostorije bez pregradnih zidova, na prvome katu (slika 14.). Međutim, ta naprezanja nisu toliko kritična da bi uzrokovala rušenje zidova ili pojavu pukotina u tim zidovima. Ta su naprezanja smanjena za gotovo sedam puta nakon dodavanja armiranobetonskih ploča. Dopuštena posmična naprezanja prekoračena su u uskim lokalnim zonama blizu otvora i donjih kutova zidova. To je neizbježno zbog prirode elemenata koji su se rabili u analitičkom



Slika 13. Pomaci nakon dodavanja armiranobetonskih ploča od opterećenja  $EQ_x$  (a) i  $EQ_y$  (b)



Slika 14. Najveća posmična naprezanja prije dodavanja armiranobetonskih ploča od opterećenja  $G + EQ_x$  (a) i  $G + EQ_y$  (b)

modelu i zbog pretpostavljenih uvjeta nosivosti. S obzirom na rečeno, lako se može zaključiti da će oštećenja od posmičnih naprezanja biti samo lokalnog karaktera te da neće bitno utjecati na stabilnost cijele konstrukcije.

Nakon analize rezultata zaključeno je da dopuštene razine tlačnog i posmičnog naprezanja prema turskom zakonu nisu prekoračene u konstrukcijskim elementima građevine.

## 5 Zaključne napomene

U Anatoliji danas nalazimo velik broj povijesnih zidanih građevina od kojih su mnoge još uvijek u upotrebi. Na nekima od tih kuća obavljene su razne arhitektonske i konstrukcijske izmjene, da bi se prilagodile zahtjevima suvremenog načina života. Za konzervaciju ili prenamjenu takvih građevina obično su dostupna ograničena financijska sredstva. Zbog takvih ograničenja nedovoljno se vremena, stručnog rada ili novca može odvojiti za potpuno razumijevanje ponašanja konstrukcija takvih građevina. Ovim radom autori žele dokazati da se ponašanje konstrukcija povijesnih zidanih građevina, na kojima se žele obaviti naknadne izmjene, može provjeriti primjenom relativno jednostavnih analitičkih metoda.

Statičke i dinamičke analize stogodišnje zidane kuće u Kapadokiji obavljene su analitičkim modelima izrađenih programom SAP2000 da bi se tako stekle spoznaje o tome kako se građevina ponaša pod gravitacijskim opterećenjem i pod seizmičkim djelovanjem, i to s arhitektonskim izmjenama i bez njih. Analize provedene uzimajući u obzir sadašnje statičke podatke, postojeći turski Zakon o potresima te veći faktor rizika od sadašnjeg, dokazuju da izvedba armiranobetonske ploče te predložene arhitektonske izmjene neće negativno utjecati na

seizmičko ponašanje građevine. Dapače, ugradnjom armiranobetonske ploče povećala se krutost i stabilnost konstrukcijskog sustava.

Za potresa bi građevina bila podvrgnuta opterećenjima koja su proporcionalna masi građevine. Moglo bi se stoga reći da će seizmička opterećenja porasti zato što je dodana masa armiranobetonske ploče. Međutim, ako dodanu masu ploče usporedimo s ukupnom masom građevine, tada vidimo da ta dodana težina nije dovoljno kritična da bi negativno utjecala na seizmičko ponašanje konstrukcijskog sustava. S druge strane, zbog učinka horizontalne dijafragme uvedenog ugradnjom armiranobetonske ploče, deset metara visoki zidovi ne mogu djelovati kao neovisne vertikalne konzole. Dakle, povezani pločom, zidani zidovi djelovat će kao jedinstvena cjelina i onemogućit će razvoj pretjeranih pomaka u toku potresa.

Prema rezultatima analiza, preostale izmjene, od kojih je najkritičnije izvođenje nekoliko otvora u nosivim zidovima u prizemlju, neće uzrokovati naprezanja koja bi izazvala stvaranje pukotina ili izazvala rušenja koja bi mogla ugroziti ukupnu stabilnost građevine. Iz analitičkih su modela izostavljeni neki arhitektonski detalji jer je prvenstveni cilj ove studije prikazivanje jednostavne i brze metode za postizanje rezultata koji su točni u nekim prihvatljivim granicama. Sveukupni rezultati analiza dokazuju da će ova povijesna zidana građevina, nakon uvođenja predloženih konstrukcijskih i arhitektonskih izmjena, biti sigurna, tj. otporna na djelovanje gravitacijskih opterećenja i seizmičkih djelovanja. Prikazani osnovni analitički postupak može se primjenjivati pri konzerviranju ili adaptaciji sličnih povijesnih zidanih kuća ne samo u Anatoliji, nego i u drugim regijama sa sličnim graditeljskim naslijeđem.

### Zahvale

*Ova je studija izrađena u okviru konzultantskih usluga koje je pružio Fakultet arhitekture METU za tvrtku KA-BA za konzervaciju povijesnih građevina i arhitekturu d.o.o. Autori se ovim putem žele zahvaliti gosp. Grigoris Hadjieleftheriadisu i Gulgun & Cengiz Kabaogluu.*

## LITERATURA

- [1] Sucuoğlu, H.; Erberik, A.: Ocjena ponašanja trokatne nearmirane zidane građevine u toku zemljotresa koji je 1992. g. zadesio Erzincan, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 26 (1997) 3 319 – 336.
- [2] Betti, M.; Vignoli, A.: Modeliranje i analiza romaničke crkve na potresno opterećenje: Ocjena seizmičke otpornosti, *Engineering Structures* 30 (2008) 2 352 – 367.
- [3] Unay, A.I.: Ocjena sigurnosti konstrukcija povijesnih zidanih građevina, *Architectural Science Review* 50 (2007) 1 26 – 30.
- [4] Unay, A.I.: Metoda za ocjenu granične sigurnosti povijesnih zidanih građevina. Neobjavljena doktorska disertacija izrađena na Bliskoistočnom tehničkom sveučilištu. (1997)
- [5] Yi, T.; Moon, F.L.; Leon R.T.; Kahn, L.F.: Analiza dvokatne nearmirane zidane građevine, *Journal of Structural Engineering ASCE* 132 (2006) 5 653 – 662.
- [6] Lang, K.; Bachmann, H.: O seizmičkoj osjetljivosti postojećih nearmiranih zidanih građevina, *Journal of Earthquake Engineering* 7 (2003) 3 407 – 426.
- [7] SAP 2000, Računalni program. *Computers and Structures*, Berkeley, USA, (2000)
- [8] Ministarstvo javnih radova i stanovanja, vlada Republike Turske, Tehnički uvjeti za građevine koje se grade u potresnim područjima, (2007)
- [9] Özmen, B.; Nurlu, M.; Güler, H.: Coğrafi Bilgi Sistemi ile Deprem Bölgelerinin İncelenmesi. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara (1997) p. 89
- [10] Akkar, S.; Yazgan, U.; Gulkan, P.: Procjena pomaka okvirnih građevina pri kretanju tla u blizini rasjeda, *Journal of Structural Engineering* 131 (2005) 7 1014 – 1024.
- [11] Yakut, A.: Preliminarna ocjena seizmičkog ponašanja postojećih armiranobetonskih građevina. *Engineering Structures* 26 (2004) 10 1447 – 1461.